

FABRICAÇÃO DE REATORES DE PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO: MANUAL DE PROCEDIMENTOS

Autor: João José Moura Vieira (Universidade Federal do Ceará - UFC)

Co-Autores:

Breno Brito de Andrade (Universidade Federal do Ceará - UFC); Hariel Abreu Pereira (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE); Auzuir Ripardo de Alexandria (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE).

Resumo:

O atual contexto global demanda por fontes alternativas de energia em detrimento dos combustíveis fósseis, sobretudo o petróleo. As energias renováveis atuam como principal veículo da transição energética, sendo uma das principais dificuldades para sua implementação, a ineficiência do transporte em grandes distâncias. Nesse tocante, o hidrogênio atua como vetor energético de alta densidade, contribuindo para o armazenamento e distribuição de energias renováveis intermitentes, além de diversas aplicações semelhantes às do petróleo na indústria. Vale ressaltar que o Hidrogênio não é encontrado na natureza em sua forma pura, necessitando do consumo de alguma fonte primária para sua obtenção. Nesse sentido, o hidrogênio “musgo”, isto é, hidrogênio produzido em processos de digestão anaeróbia utilizando biomassa, configura-se como uma das rotas tecnológicas mais promissoras, já que, em muitos casos, é capaz de atuar como sumidouro de CO₂ da atmosfera. No entanto, por utilizar o metabolismo de seres anaeróbios, principalmente bactérias e algas, os reatores de produção de Hidrogênio Musgo demandam diversos requisitos de design para garantir um ambiente interno inerte e vedado. Nesse contexto, este trabalho propõe um manual de procedimentos para a fabricação de reatores de produção de hidrogênio, utilizando como base uma Célula de Eletrólise Microbiana de 300 mL. Dessa forma, pretende-se elucidar o procedimento de utilização de Resina Epóxi, suas características, requisitos e condições para a materialização de outros reatores semelhantes.

Palavras-Chave: Biohidrogênio; Impressão 3D; Fabricação de Reatores.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização humana, a utilização da energia esteve atrelada ao desenvolvimento das sociedades. Quanto maior a quantidade de energia disponível, maior a capacidade de crescimento e desenvolvimento de uma determinada população (CARVALHO, 2014).

Com a constante evolução tecnológica, houve um aumento da necessidade da descoberta e utilização de novas fontes de energia. O que teve início com tração humana e animal, evoluiu gradualmente, até que, com a primeira revolução industrial, a energia advinda de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, tornou-se a mais utilizada, o que se expande até os dias atuais, com o uso do petróleo (CARVALHO, 2014).

Segundo Silva (2019, p. 144),

"Entre outras commodities existentes, o petróleo exerceu crescentemente um papel central, sendo considerado um dos mais importantes recursos naturais existentes. De facto, comparando com outros recursos fósseis, tais como o carvão e o gás natural, o petróleo é mais potente, fácil de transportar, armazenar e capaz de ser transformado em diferentes produtos (combustível e produtos)".

Diante disso, é possível entender a crescente influência que o petróleo teve a partir da segunda revolução industrial, ocorrida no século XX. A sua facilidade no transporte, somada a vasta gama de produtos produzidos por derivados do petróleo, fizeram desse combustível o principal vetor energético do século passado. (SILVA, 2019) Entretanto, como todos os outros combustíveis fósseis, a utilização do petróleo vem atrelada a grandes emissões de diversos gases nocivos à atmosfera, com um grande destaque, o Dióxido de Carbono (CO₂), gás potencializador do efeito estufa. (DRUMM et al., 2014).

Nesse tocante, visando reduzir a influência dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial, diversos países adotaram políticas econômicas que incentivam o uso de energias limpas, sustentáveis e advindas diretamente do meio ambiente, que comumente são referidas como Energias Renováveis, a exemplo das fontes solar e eólica. (SILVA, 2019).

No entanto, apesar desse incentivo governamental e do alto potencial de geração de energia, essas fontes renováveis têm uma grande desvantagem quando comparadas ao petróleo, visto que a sua distribuição ocorre em forma de energia

elétrica, feito por cabeamento, o que, em comparação à versatilidade do petróleo, não é viável economicamente para longas distâncias, sobretudo entre continentes. Dessa maneira, o excedente energético de locais com alta capacidade de produção, como o Brasil, não pode ser transmitido diretamente à Europa, por exemplo, que, por sua vez, possui baixa capacidade de geração por fontes renováveis associado a um alto consumo.

Portanto, como uma forma de contemplar esse continente e poder abastecê-lo de energia elétrica renovável, outras alternativas que suscitam o problema anteriormente citado, atrelado ao problema da exportação, tiveram que ser desenvolvidas, como é o caso do hidrogênio verde. Sendo esse, um gás bastante promissor em função da sua nula emissão de gás carbônico para a atmosfera, ao mesmo passo que funciona como um vetor energético, do qual possui alta eficiência em utilizações industriais e combustíveis, em detrimento da utilização de fontes fósseis (BEZERRA, 2021).

Atualmente, o hidrogênio e suas formas de geração para utilização nos mais diversos meios de produção tem sido uma pauta muito discutida e fomentada, principalmente como um viés na contribuição do avanço das energias renováveis. Dessa forma, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021), “o mercado de hidrogênio ganhará momentum a partir de políticas energéticas pós-pandemia para a retomada da economia e para acelerar a transição energética em diversos países”. Tais esforços governamentais e empresariais em todo o mundo estão sendo destinados ao desenvolvimento dessa classificação de hidrogênio ecologicamente sustentável, denominado “hidrogênio verde”, que utiliza de energia elétrica oriunda de fontes de energias renováveis para sua formação, a partir do processo físico-químico da eletrólise da água, comumente utilizando as fontes solar fotovoltaica e eólica *onshore* ou *offshore*

Diante disso, vale destacar que o hidrogênio verde anteriormente comentado e que hoje em dia está no foco de desenvolvimento de diversas partes do mundo não possui a coloração verde, sendo este um gás incolor. A utilização do nome “verde” é denotada para classificar sua forma de produção, e diferenciá-la das demais rotas de geração do hidrogênio. Dessa maneira, o denominado “arco-íris do hidrogênio” foi desenvolvido como forma de abranger todas essas classificações de formas de produção do H₂ por uma escala de cores, e que perpassa desde o

“hidrogênio preto”, produzido por gaseificação do carvão mineral do tipo antracito, até o “hidrogênio rosa”, produzido por fonte de energia nuclear. (EPE, 2021)

Assim, como representação do arco-íris do hidrogênio abordado no parágrafo anterior, sua escala de cores é exposta a seguir pela Figura 1.

Figura 1: Arco-Íris do Hidrogênio.

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
■	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE, 2021

Já com relação à biomassa, configura o método conhecido como “hidrogênio musgo”. Quando essa biomassa é submetida a determinados processos biológicos, o hidrogênio passa a ser chamado de biohidrogênio, um ramo do hidrogênio musgo, que possui a grande vantagem de um perfil líquido de emissões negativo, isto é, retira gases de efeito estufa da atmosfera durante a produção do Hidrogênio, sobretudo quando comparado à ausência da aplicação desses métodos. Além disso, também é comum associar o biohidrogênio a um menor consumo de energia em relação aos demais processos. Em síntese, há três bioprocessos principais, a saber: biofotólise, que pode ser direta ou indireta; fermentação, subdividindo-se em fotofermentação e fermentação escura e eletrólise microbiana. (SIVARANJANI et al., 2023).

A eletrólise microbiana insere-se no ramo das tecnologias bioeletroquímicas, isto é, utiliza as reações de oxirredução para a geração de produtos de alto valor, como o hidrogênio. Nesse sentido, uma Célula de Eletrólise Microbiana (MEC, do inglês *Microbial Electrolysis Cell*) promove tanto a produção do gás hidrogênio quanto a redução da carga orgânica de um substrato. As MECs são dispositivos movidos por meio da digestão anaeróbia de bactérias exoeletrogênicas, isto é, capazes de produzir prótons (H⁺) e elétrons (e⁻) ao oxidar a matéria orgânica presente em um substrato, alocadas em uma câmara com um eletrodo (ânodo), também chamada de câmara anódica. (LOGAN, 2008).

Embora seja uma alternativa promissora, a produção em larga escala de hidrogênio ainda enfrenta desafios, especialmente em relação aos custos operacionais que, atualmente, não são competitivos quando comparados às vias tradicionais de produção do hidrogênio. No entanto, a biotecnologia pode ser uma aliada para viabilizar os processos associados ao biohidrogênio, independentemente da via de produção, algumas pesquisas visam aumentar o rendimento e reduzir os custos do processo, incluindo o *design* dos reatores, a seleção de microrganismos com maior capacidade produtiva e a engenharia genética e metabólica para otimizar as rotas de produção do hidrogênio.

No âmbito do *design* dos reatores, devido à geração de biohidrogênio estar associada ao metabolismo bacteriano, uma das problemáticas enfrentadas consiste na composição estrutural dos dispositivos, visto que, as estruturas metálicas comuns em reatores químicos convencionais acarreta em uma série de problemas, como a bioincrustação, a contaminação das paredes, as perdas por transferência de massa e, principalmente, a estabilidade do inóculo. (Fudge *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que reatores produtores de hidrogênio deparam-se frequentemente o processo conhecido como "fragilização por hidrogênio", fenômeno resultante do diminuto tamanho da molécula de hidrogênio, com alta capacidade de permeação pela rede cristalina dos materiais e ligas utilizados em diversos projetos de engenharia, resultando no vazamento do gás.(FERREIRA, 2007). Nesse aspecto, reatores de biohidrogênio necessitam ser inertes e resistentes à fragilização por hidrogênio, fazendo necessária a aplicação de materiais como a Resina Epóxi, Fibras de Vidro e outras composições que confirmam resistência à tais condições.

2 OBJETIVOS

Diante do exposto, este trabalho possui como objetivo geral a composição de um manual de fabricação de reatores inertes destinados à produção de biohidrogênio, utilizando o relato de experiências baseado na materialização de um protótipo de MEC.

Nesse sentido, concomitantemente, foram delineados os seguintes objetivos específicos para a efetivação da proposta deste trabalho:

a) Idealizar, com base em pesquisas bibliográficas, a configuração do reator MEC utilizado como modelo para a execução dos procedimentos de manufatura;

b) Dimensionar e projetar, utilizando recursos de *software*, o protótipo de reator em formatação adequada à manufatura aditiva em impressão 3D;

c) Efetivar a impressão em 3D das peças (positivo), bem como a materialização dos moldes (negativo) em borracha de silicone líquida, além da modelagem em resina epóxi;

d) Confeccionar um manual de procedimentos, explicitado neste trabalho, para elucidar, minuciosamente, as etapas padrão direcionadas à adoção para reatores inertes em geral, compreendendo desde o esboço até a materialização;

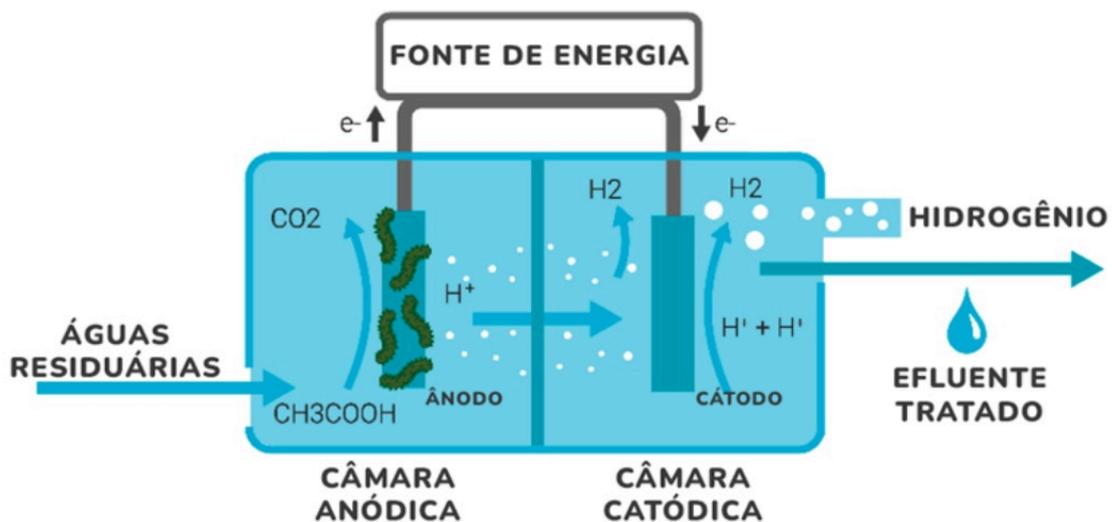
3 MATERIAIS E MÉTODOS

No intuito de cumprir as metas estabelecidas neste trabalho, propõe-se uma abordagem em quatro etapas, a saber: Projeto básico e Modelagem 3D; Impressão dos Moldes; Modelagem do reator em Resina Epóxi; Adequações e Acabamento.

3.1 Projeto Básico e Modelagem 3D

Para a idealização do projeto básico, foi realizada uma revisão bibliográfica, com o intuito de nivelar os conhecimentos acerca de reatores inertes e o funcionamento das MECs, que será base para a realização dos procedimentos adotados neste trabalho. Uma configuração comum para esses dispositivos é apresentada na Figura 2, que esclarece o diagrama de funcionamento básico de uma MEC, em que é possível observar, de maneira objetiva, o reator em câmara dupla, em virtude das reações eletroquímicas de oxirredução que ocorrem em seu interior, ou seja, câmara anódica e câmara catódica, além da separação por membrana.

Figura 2: Funcionamento Básico de uma MEC



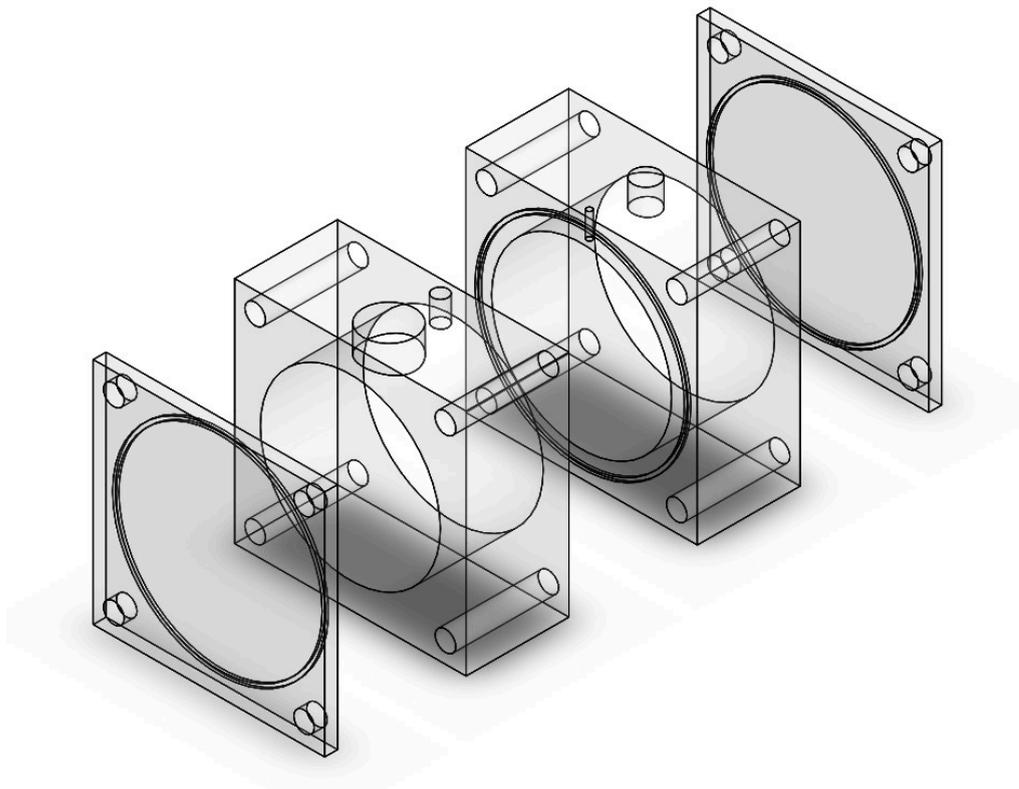
Fonte: Adaptado de Fudge, T. *et al.* (2021).

Dessa maneira, em virtude da presença da membrana de separação entre dois meios preenchidos com líquidos, um dos grandes impasses nesse tipo de reator é a vedação.

Assim, foi esboçado o projeto básico do reator de eletrólise microbiana em análise neste trabalho por meio do *SolidWorks®*, da desenvolvedora *Dassault*

Systèmes S.A, software de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*), responsável por auxiliar o projetista na concepção de expressões gráficas tridimensionais, com a possibilidade de exportação no formato **.stl** (do inglês *Standart Triangle Language*), isto é, um formato de arquivo 3D dividido em camadas bidimensionais triangulares, que podem ser lidos por softwares de fatiamento como o Cura®, desenvolvido pela *Ultimaker*, cuja principal função é a conversão do arquivo em **.stl** para o formato **.gcode**, que, por sua vez, contém as instruções para diversos modelos de impressoras 3D pré-instaladas no Cura, guiando os seus componentes, sobretudo os motores para a ideal impressão da peça, isto é, um procedimento de Manufatura Aditiva, adicionando camadas do material sobre uma superfície de trabalho. Nesse sentido, a Figura 3 permite a visualização isométrica da Célula de Eletrólise Microbiana que baseou este estudo.

Figura 3: Reator de Biohidrogênio: Visualização Isométrica



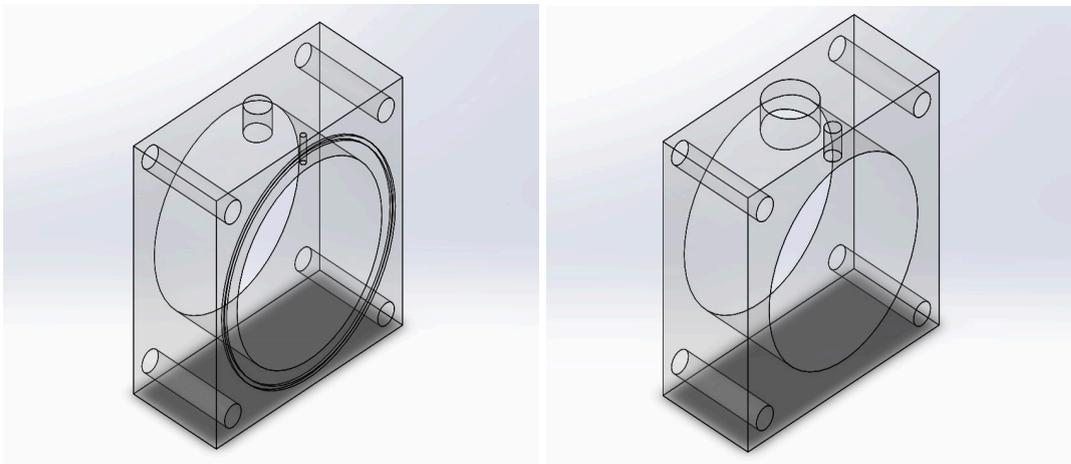
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse tocante, visando ao melhor desempenho possível do reator, foram elaborados quatro desenhos representativos das peças, que juntas compõem a MEC proposta, essas peças devem ser fixadas por meio de parafusos. Em vista

disso, é possível notar nas extremidades de cada peça as quatro perfurações de 8 milímetros de diâmetro destinadas à essas estruturas de fixação.

As peças localizadas nas extremidades, são idênticas, isto é, só necessitam de um molde, e foram chamadas de “capas”, com dimensões de 90 por 90 milímetros, e espessura de 5 milímetros. Essas capas contém um fenda circular com 66 milímetros de diâmetro externo e 64 milímetros de diâmetro interno para a inserção de anéis de vedação de borracha, comumente referidos como “o-rings”, visando à estanqueidade do reator.

Figura 4: Reator de Biohidrogênio: Câmaras anódica (esquerda) e catódica (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A câmara anódica, localizada à esquerda da Figura 4, é o local de inoculação das bactérias exoeletrogênicas e da presença do ânodo, contendo dimensões de 90 por 90 milímetros, e espessura de 40 milímetros. Nela, estão presentes: o centro da câmara, com 70 milímetros de diâmetro, o furo para a entrada do ânodo, com 2,20 milímetros de diâmetro, o orifício para entrada do substrato orgânico com a biomassa fonte do Hidrogênio, com 10 milímetros de diâmetro, além de uma fenda circular semelhante para a inserção do anel de vedação central.

Por fim, a câmara catódica, localizada à direita da Figura 4, é o meio em que ocorre a Reação de Evolução do Hidrogênio neste dispositivo, especialmente pela presença do cátodo, sendo composta de dimensões semelhantes às da câmara anódica. Nela, estão contidos o centro da câmara, com 70 milímetros de diâmetro, um furo para a entrada do cátodo, com 6 milímetros de diâmetro e um orifício para a retirada do hidrogênio, com 20 milímetros de diâmetro.

Com o objetivo de atingir a menor distância entre os eletrodos, os orifícios feitos entre as câmaras da Figura 4, tinham a idealização da proposta de “zero gap”, em que as posições do ânodo e do cátodo devem ser separadas pela menor distância possível, uma vez que isso proporciona menores perdas ôhmicas e por transferência de massa, maior eficiência energética e a possibilidade de operar em menor tensão (PLETCHER; LI, 2011).

3.2 Impressão 3D e Moldes

A segunda parte deste estudo envolveu vasto aparato de impressão 3D, utilizou-se, para isso, dos recursos do Laboratório “Oficinas 4.0” do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE) - *Campus* do Benfica para confecção do molde. Este foi executado a partir da impressora “Ender 3 V2”, com configurações básicas representadas na Tabela 1, empregando o polímero do tipo poliacido láctico (PLA), polímero biodegradável advindo de fontes renováveis, vastamente utilizado para a produção de utensílios domésticos e impressões 3D, como filamento de impressão. (OLIVEIRA; BORGES, 2020)

Tabela 1: Especificações Técnicas: Ender 3 V2

Especificação	Detalhes
Modelo	Creatility Ender 3 V2
Tecnologia de Impressão	Fused Deposition Modeling (FMD)
Volume de Impressão	220mm x 220mm x 250mm
Precisão de impressão	± 0,1 mm
Velocidade de impressão	Até 180mm/s
Materiais Suportados	PLA, ABS, TPU, PETG e mais
Extrusora	Bico único MK8
Diâmetro do Bico	0,4mm (Substituível)
Software de Fatiamento	Cura, Simplify3D, PrusaSlicer e outros
Dimensões	475mm x 470mm x 620mm
Peso	9kg
Fonte de Alimentação	24V,270W (Fonte de Alimentação Certificada)

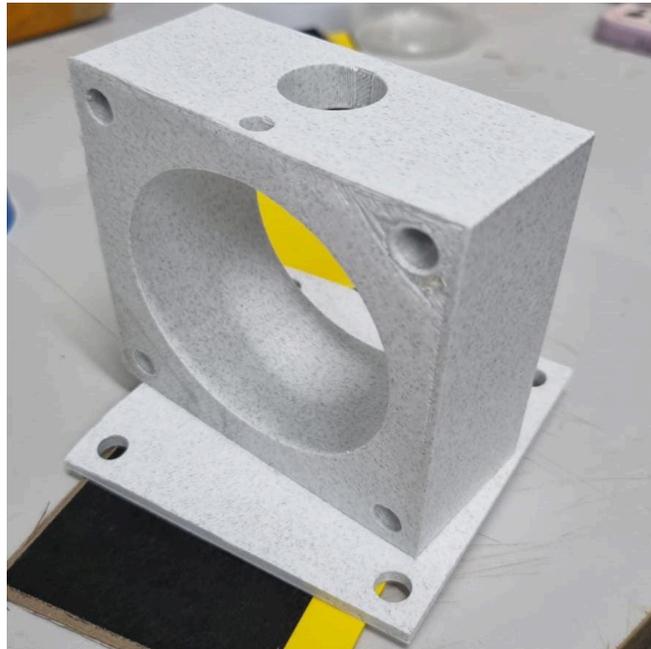
Fonte:GTMax3D - Impressoras 3D

Com o arquivo do projeto em **.gcode**, foram impressas as quatro peças no intervalo de dois dias. As capas foram produzidas em cerca de quatro horas cada,

enquanto as câmaras, anódica e catódica, levaram ambas, em média, dezoito horas para a sua confecção.

Por fim, realizou-se um teste de vedação com o molde impresso, em que foi verificado que o material da impressão 3D não conferia as características de vedação adequadas ao processo de eletrólise microbiana, além disso, o material PLA é um plástico biodegradável, que, com o passar do tempo, também seria consumido pelas bactérias no interior desta célula e de outros reatores para produção do biohidrogênio. Também foi notória a presença de microfissuras entre as camadas impressas, o que poderia facilitar a formação de biofilme bacteriano distante do eletrodo, reduzindo a eficiência energética do dispositivo. A Figura 5 evidencia o resultado final das peças impressas em 3D.

Figure 5: Câmara catódica e capa, em filamento PLA



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Modelagem em Resina Epóxi

Para a terceira seção deste estudo, todos os procedimentos foram realizados nas instalações do Laboratório de Combustão, Energias Renováveis e Hidrogênio do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, em que foi possível contar com a infraestrutura e os equipamentos básicos para a efetivação da fabricação dos reatores, a exemplo de vidrarias, misturadores e locais para a secagem das resinas.

Inicialmente, foram confeccionadas caixas retangulares de papel cartão para a fixação das peças 3D. Em seguida, foi aplicado o desmoldante, substância responsável por auxiliar na retirada do molde de silicone (posterior ao processo de cura), na superfície das peças. Após isso, preparou-se a borracha de silicone, dissolvendo 15g do catalisador, composto por uma solução de ésteres e estanho, em 500g de borracha. O processo de mistura consistiu em utilizar uma espátula de madeira, em um recipiente separado, para homogeneizar a solução, que inicialmente apresentava elevada viscosidade, até a viscosidade ideal, cuja consistência se assemelhava a de um líquido, com algumas pequenas bolhas de ar na parte superior. Dessa forma, a solução foi reservada durante 30 minutos para liberar o excesso de ar em seu interior, aumentando a fidelidade dos detalhes do molde.

Posteriormente, a solução foi depositada, individualmente, nas peças impressas, tal que a faixa de líquido derramada fosse muito fina, para diminuir a formação de bolhas de ar, sendo o depósito de solução em ambas as câmaras de 175g, e em cada uma das capas de 75g. Em seguida, com todas as peças envoltas por silicone, os moldes ficaram reservados por 20 horas, à temperatura ambiente, para ocorrer o processo de cura. Por fim, os moldes negativos, devidamente concluídos, foram retirados das peças 3D, ficando separados para serem utilizados mais à frente no estudo.

Figura 6: Molde da Câmara Anódica,



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, utilizou-se de resina epóxi, um polímero termofixo que se enrijece ao ser misturado com um agente catalisador chamado “endurecedor” (AG Resinas, s.d.), para execução do reator. Uma vez que essa resina é caracterizada como uma substância tóxica, foi necessária a utilização de equipamentos de segurança adequados, como luvas e máscara de proteção, para seu manuseio de forma adequada.

Após isso, foi adicionada a resina epóxi e o endurecedor, com proporção de 2:1, respectivamente, em um recipiente externo para ser feita a mistura entre os dois líquidos com o auxílio de uma espátula de madeira. Sendo o ideal estado homogêneo identificado no momento em que a coloração antes translúcida da resina estivesse com um aspecto transparente. Terminado esse processo, adicionou-se tal mistura ao molde negativo, de forma cuidadosa por meio de um fino filete do líquido para que não houvesse a formação de bolhas. Sendo repetido esse processo para todas as quatro peças do reator, em que possuíram ambas as câmaras 150 gramas e ambas as capas 50 gramas.

Por fim, após o processo de cura de 20 horas, à temperatura ambiente, as peças foram removidas do molde negativo, estando assim finalizada a confecção das partes do reator.

3.4 Adequações e acabamento

Esta etapa do estudo consistiu no aperfeiçoamento e acabamento do reator. Inicialmente, com o intuito de tornar a célula mais maneável e transparente, foi realizado um polimento com lixas no seu exterior. Em seguida, como mostrado na figura 7, foram comprados: quatro parafusos com diâmetro de 8 milímetros; quatro porcas com diâmetro de 8 milímetros; três “*o-rings*” com diâmetro de interno de 64 milímetros e externo de 66 milímetros; um cátodo, constituído de uma malha circular de platina, com haste de *Teflon*®; um anodo, composto por cerdas de grafite, no formato de uma escova, com haste de titânio; uma membrana PEM, do inglês *proton-exchange membrane* (PEM), com espessura de 164 micrômetros.

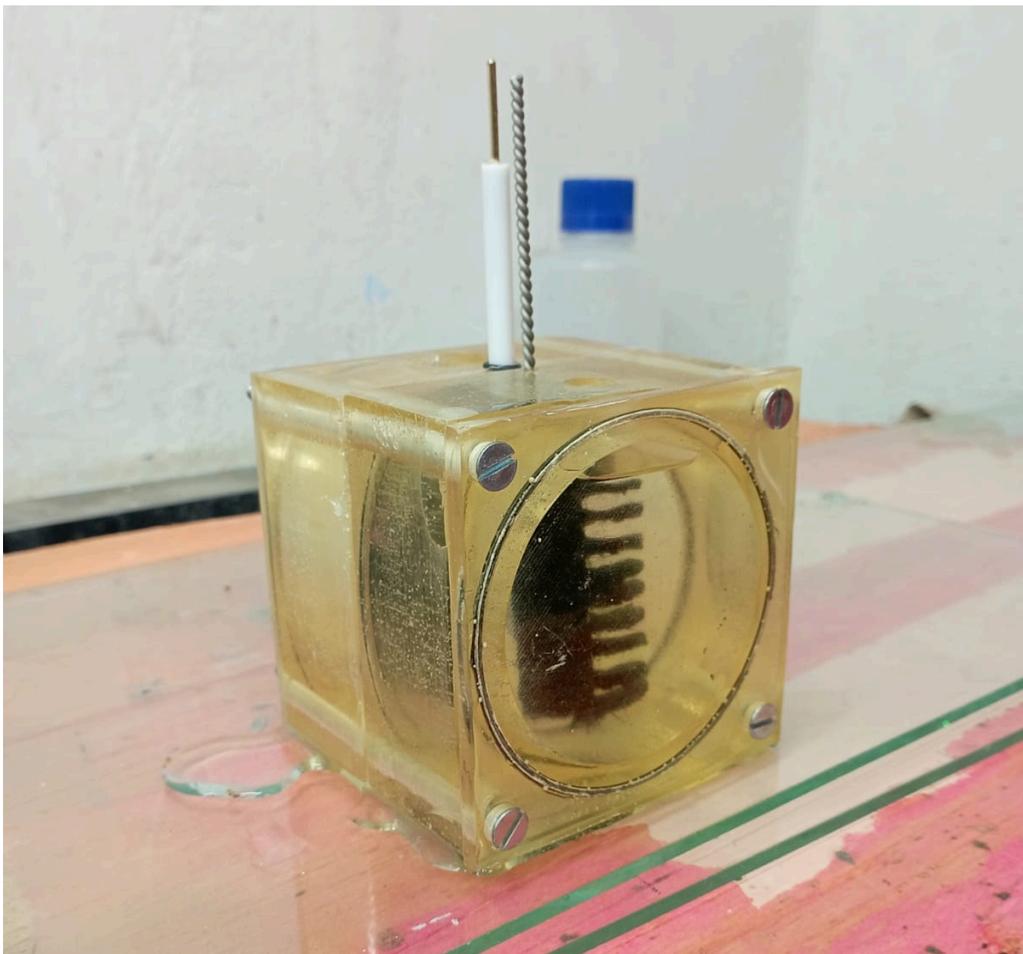
Por fim, todos os componentes foram estruturados em seus respectivos orifícios, como explicitado no tópico 3.1, finalizando, assim, a montagem do reator, como mostrado na Figura 8.

Figura 7: Componentes do reator de biohidrogênio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Teste de vedação com reator concluído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da realização do estudo e da prática abordados neste projeto, pode-se afirmar que houve êxito no que foi inicialmente definido como diretrizes do presente trabalho. Assim, foi apresentada a pesquisa realizada para o nivelamento dos conceitos básicos sobre a teoria acerca do funcionamento da célula de eletrólise microbiana, para com base nisso possibilitar o desenvolvimento prático proposto. Sendo este de suma importância, ao fundamentar os conhecimentos que posteriormente foram idealizados na configuração do reator.

Com isso, o projeto básico do protótipo foi executado com o auxílio da ferramenta *SolidWorks*® que possibilitou a criação do molde em 3D após as etapas de Manufatura Aditiva baseadas em impressão 3D, sobretudo com o auxílio do *software Cura*®. No entanto, a manufatura com filamentos de PLA não conferia, ao reator que este trabalho se baseia, as características necessárias, sobretudo com relação à vedação, que compromete o seu funcionamento.

Para solucionar tal problemática, desenvolveu-se a alternativa de utilizar o molde de PLA para a fabricação de um molde negativo em borracha líquida de silicone, possibilitando a criação, a partir desse, do molde definitivo de Resina Epóxi, sendo crucial para o desenvolvimento do projeto, uma vez que isso propiciou a resolução dos problemas de vazamento e, conseqüentemente, o bom desempenho e eficiência do reator. A partir de toda a prática realizada para a execução do protótipo de MEC, foi possível elaborar tal manual, instruindo e elucidando todas as etapas envolvidas nesse processo. Com bom nível de registro e detalhes, compreendeu-se a necessidade da publicação deste trabalho para basear futuros projetos similares, além de poder contribuir de forma positiva para o avanço dos estudos acerca do Hidrogênio Musgo, e assim, da nova matriz energética em estruturação.

Sob essa ótica, ressalta-se que o procedimento adotado neste estudo pode ser replicado para a fabricação de reatores inertes de pequeno porte, tendo como características principais o bom nível de controle sobre o formato do reator, dada a versatilidade do projeto tridimensional oferecida na etapa de projeto básico, a fidelidade a esses detalhes em virtude das técnicas de manufatura aditiva e modelagem, além dos benefícios da utilização da Resina Epóxi, como a estabilidade, a resistência, o baixo custo e o aspecto final do reator.

Ademais, as principais dificuldades encontradas foram: à falta de experiência com trabalhos artesanais na Engenharia; o alto número de etapas que devem ser minuciosamente seguidas para o resultado ideal; a necessidade de experiência prévia com esse tipo de modelagem, que, muitas vezes, encontra-se restrita ao campo comercial, como na produção de chaveiros. Nesse aspecto, ressalta-se a tentativa mal sucedida de compor este reator por outras técnicas, como Manufatura Subtrativa em acrílico por meio de máquinas do tipo fresa, fabricação das peças em vidro e outras possibilidades em que a barreira de custo impossibilitou sua efetivação.

Em conclusão, este trabalho buscou salientar a importância do hidrogênio, sobretudo o biohidrogênio, no contexto de transição energética global, além de deixar explicitado a possibilidade de produzir, de maneira artesanal e acessível, um reator deste vetor energético. Nesse aspecto, o intuito principal era repassar as experiências acerca da confecção de uma célula MEC, com o fito de incentivar outras pesquisas e relatos de casos sobre essa área, ainda pouco expressiva na literatura científica brasileira.

MANUFACTURING OF BIOHYDROGEN PRODUCTION REACTORS: PROCEDURES MANUAL

Abstract:

The current global context demands alternative sources of energy instead of fossil fuels, especially oil. Renewable energies act as the main driver of the energy transition, with the main drawback being the inefficiency of long-distance transportation. In this regard, hydrogen serves as a high-density energy vector, contributing to the storage and distribution of intermittent renewable energies, as well as various applications similar to those of oil in the industry. It is worth noting that Hydrogen is not found in nature in its pure form and requires the consumption of some primary source for its production. In this sense, "moss" hydrogen, produced in anaerobic digestion processes using biomass, emerges as one of the most promising technological routes since, in many cases, it can act as a sink for CO₂ from the atmosphere. However, as it utilizes the metabolism of anaerobic organisms, mainly bacteria and algae, Moss Hydrogen production reactors require various design requirements to ensure an inert and sealed internal environment. In this context, this work proposes a procedures manual for the fabrication of hydrogen production reactors, using a 300 mL Microbial Electrolysis Cell as a basis. Thus, the intention is to elucidate the procedure for using Epoxy Resin, its characteristics, requirements, and conditions for the realization of other similar reactors.

Keywords: Biohydrogen; 3D Printing; Reactor Manufacturing.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Centro de Desenvolvimento e Estudos Estratégicos do Banco do Nordeste**, Fortaleza, v. 212, dez. 2021. Disponível em: https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 28, n. 82, p. 13-30, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/GYqnmvDvtGtr8N5zdsYdj5j/?lang=pt>. Acesso em: 05 fev. 2024.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 122-133, abr. 2014. DOI: 10.5902/2236117010537. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117010537>. Acesso em: 04 fev. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica: Hidrogênio. Rio de Janeiro: EPE, 2023. 112 p. (Série Estudos Prospectivos, n. 569).

FERREIRA, P. F. P. Infra-estrutura para uso energético do hidrogênio: estações de abastecimento para veículos com células a combustível. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2007.440581. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2007.440581>. Acesso em: 09 fev. 2024.

FUDGE, T.; BULMER, I.; BOWMAN, K.; PATHMAKANTHAN, S.; GAMBIER, W.; DEHOUCHE, Z.; AL-SALEM, S. M.; CONSTANTINOU, A. Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps. **Water**, v. 13, n. 4, 2021. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/445>.

GTMAX3D. (2023). **Soluções em 3D**. Fortaleza, CE: GTMAX3D. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/>. Acesso em: 08 fev. 2024.

LOGAN, B. E. **Microbial Fuel Cells**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2008

OLIVEIRA, A. C. S.; BORGES, S. V. Poli (Ácido Lático) Aplicado para Embalagens de Alimentos: Uma Revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n. 1, p. 1-10, jul. 2020. Disponível em:

<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/713/501>.

Acesso em: 08 fev. 2024.

PLETCHER, D.; LI, X. Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 23, p. 15089-15104, nov. 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.080. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319911020015?via%3Dihub>. Acesso em: 07 fev. 2024.

SANTOS, F. M. Transição energética: enquadramento e desafios. **Vídere: Revista da Faculdade de Direito da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, v. 11, n. 22, p. 112-126, dez. 2019. DOI: 10.30612/videre.v11i22.11217. Disponível em:

<https://doi.org/10.30612/videre.v11i22.11217>. Acesso em: 04 fev. 2024.

SIVARANJANI, R.; VEERATHAI, S.; JENIFER, K. J.; SOWMIYA, K.; RUPESH, K. J.; SUDALAI, S.; ARUMUGAM, A. A comprehensive review on biohydrogen production pilot scale reactor technologies: Sustainable development and future prospects.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 62, p. 23785-23820, jul. 2023.

DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.161. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923012314?via%3Dihub>. Acesso em: 06 fev. 2024.

